


0 7 2 1 7 9 3 - 1

На правах рукописи

КАРПАЧЕВ Александр Трофимович


28.04.07

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОВАЛОВ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Москва - 2001

Работа выполнена в Институте земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Михайлов А.В.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000875814

доктор физико-математических наук
профессор Колесник А.Г.

доктор физико-математических наук
профессор Денисенко П.Ф.

Ведущая организация: Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Защита состоится «29» мая 2001 г. в 14³⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 в
ИЗМИРАН – 142190, г.Троицк, Моск. обл., (проезд автобусом
531 от ст. метро «Теплый Стан» до ост. «ИЗМИРАН»)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан «28» апреля 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.237.01 ИЗМИРАН
доктор физико-математических наук

Ю.М.Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации получена наиболее полная на настоящий момент картина глобальной структуры верхней ионосферы, описывающая ионосферные провалы разных типов. Экспериментальная база диссертации основана на уникальном массиве данных спутников «Интеркосмос-19», «Космос-1809», «Космос-900» и «ISS-b». На ее основе детально изучены статистические и динамические характеристики классического ночного ГИП, летнего ночного ГИП, зимнего дневного ГИП, зимнего дневного провала, высокоширотного ионосферного провала, кольцевого ионосферного провала (КИП), среднеширотного провала в легких ионах (ПЛИ), а также разных типов субпровалов в легких ионах. С помощью расчетов и качественного анализа исследованы механизмы формирования ионосферных провалов при разных геофизических условиях, причины фоновых вариаций параметров ионосферы в области провалов, а также причины асимметрии северного и южного полушарий.

Предмет исследований. Достаточно ярко выраженное понижение плотности ионосферной плазмы относительно фонового уровня, протяженное по долготе, называется провалом ионизации. Существует несколько типов ионосферных провалов, характеристики которых могут очень сильно изменяться в разных геофизических условиях и даже пересекаться друг с другом, что затрудняет их исследование. Поэтому сформулируем хотя бы приближенные определения для ионосферных провалов, которые рассматриваются в работе.

«Главным ионосферным провалом» (ГИП) называется уменьшение плотности плазмы на высотах области F2 ниже фонового уровня от нескольких раз до двух порядков величины, наблюдающееся экваториальное авроральное овала. ГИП является стабильной характеристикой ионосферы в ночных зимних и равноденственных условиях. Определим его как «классический» ГИП. Однако ГИП может наблюдаться и в летних ночных и в зимних дневных условиях. Его характеристики в этих условиях отличаются от характеристик классического ГИП. Но всегда минимум провала расположен не далее чем на $\sim 5^\circ$ экваториальное авроральное овала. Поэтому провал в этих условиях удобно определить как «субавроральный» ионосферный провал. Таким образом, название «субавроральный» провал не является, строго говоря, синонимом ГИП.

Новый провал, обнаруженный в данной работе экваториальнее ночного ГИП, является уже чисто среднеширотным провалом. Главный ионосферный провал также часто называют «среднеширотным», в результате чего возникает терминологическая путаница. Чтобы ее избежать, новый провал был назван «кольцевым ионосферным провалом» (КИП), поскольку он связан с кольцевым магнитосферным током. Во время интенсивной бури оба провала фактически представляют собой единую структуру. Удобно определить ее в этих условиях как среднеширотный провал (СИП). Таким образом, название «среднеширотный» провал не является синонимом ГИП.

В данной работе обнаружено также, что в дневных зимних условиях ионосферный провал, расположенный экваториальнее аврорального каспа, представляет собой отдельную ветвь. Его характеристики отличаются от характеристик более экваториального дневного ГИП и так называемого высокоширотного провала. Высокоширотный провал также наблюдается на широтах аврорального овала, но ближе к его полярной границе. Поскольку определение «высокоширотный» уже было использовано, новый провал получил название «дневной зимний провал».

На больших высотах в концентрации легких ионов H^+ и He^+ также были обнаружены высокоширотный провал, среднеширотный провал (ПЛИ), связанный с плазмопаузой, и более низкоширотный субпровал. Будем понимать под ПЛИ структуру с резким падением (на один-два порядка величины) концентрации ионов H^+ и He^+ в полосе широт 5° – 20° внешней плазмосферы, которое переходит в увеличение концентрации полярнее плазмопаузы. Это увеличение может быть небольшим, но оно должно четко фиксироваться, однозначно определяя тем самым положение минимума провала. Под субпровалом в концентрации легких ионов (He^+ , H^+) также будем понимать четко определяемую структуру, с падением концентрации в три раза и более, которая наблюдается экваториальнее ПЛИ и занимает полосу широт 5° – 10° .

Актуальность проблемы. Актуальность проблемы исследования ионосферных провалов определяется многими аспектами, поскольку она затрагивает широкий круг вопросов физики и моделирования ионосферы, исследования ионосферно-магнитосферных связей, распространения радиоволн, а также НЧ-сигналов и микропульсаций

в ионосфере и плазмосфере Земли.

Провалы ионизации являются неотъемлемой характеристикой верхней ионосферы. Однако многие статистические и динамические характеристики ионосферных провалов до сих пор изучены плохо. Например, долгое время были неизвестны причины большого ($\pm 5^\circ$) разброса данных в широтном положении ГИП. На самом деле во время магнитных бурь под одним и тем же среднеширотным провалом понимали два близко расположенных, но совершенно разных провала: ГИП и КИП [Деминев, Карпачев, 1995a]. Точно так же в зимней дневной ионосфере дневной ГИП обычно путают с более высокоширотным дневным провалом [Карпачев, Афонин, 1998].

При неточности $\pm 5^\circ$ в определении положения ГИП ошибка в определении электронной концентрации может достигать порядка величины и более. Поэтому при моделировании субавроральной ионосферы сначала как можно более точно определяют положение минимума провала, а уже затем описывают параметры ионосферы. Таким образом, задача введения более адекватного индекса магнитной активности для определения положения провала является критичной для прогнозирования состояния ионосферы в области провала.

Разница в определении вероятности появления ГИП при одних и тех же геофизических условиях, но в разных экспериментах составляет десятки процентов. Причины таких больших расхождений неизвестны. Они также приводят к большим ошибкам при определении величины электронной концентрации. Это означает, что модель субавроральной ионосферы должна быть вероятностной, а вероятность образования провала для всех условий должна быть точно определена.

Вариации формы ГИП исследованы очень слабо, в частности, до сих пор неизвестно, как изменяется форма провала с ростом возмущенности. Это не позволяет построить адекватную модель возмущенной среднеширотной ионосферы и понять причины изменений концентрации в области провала во время ионосферной бури.

В формировании ГИП участвует свыше десяти процессов. Эффективность каждого из этих механизмов до сих пор точно неизвестна. Например, на наш взгляд, недооценивается роль механизма «полной тени», который является весьма эффективным при формировании ГИП в дневной зимней ионосфере южного полушария. Формирование провалов происходит на некотором фоновом уровне

ионизации. Фоновый уровень концентрации плазмы в области провала в свою очередь зависит от нескольких причин, вклад которых также не определен.

ПЛИ считается индикатором экваториальной плазмопаузы на ионосферном уровне. Однако одновременные наблюдения показывают что их положения могут сильно отличаться. Этот пример свидетельствует о том, насколько плохо мы еще знаем процессы, определяющие магнитосферно-плазмосферно-ионосферные связи.

Разрозненные попытки наблюдения субпробвалов в легких ионах приводят к представлению, что субпробвал является редким явлением, за которым стоит такой же редкий, экзотический механизм. Анализ данных спутника ISS-b показывает наличие большого количества субпробвалов разных типов, определенно связанных с разными механизмами образования [Кирпичев, Сидорова, 1999]. Это фактически открывает новое направление в исследовании физики ионосферно-плазмосферных связей.

Провалы ионизации являются источником искажений при передаче ВЧ-радиосигналов. Они в качестве волновода определяют распространение НЧ-излучений и геомагнитных пульсаций разных типов. Для решения траскторных и волноводных задач необходимо точно знать форму провала - его глубину, ширину, высоту и крутизну стенок. Поскольку форма провала геофизикам известна плохо, радиофизикам приходится решать обратную задачу - определять характеристики провала по характеристикам радиосигналов.

Выше перечислено только несколько наиболее острых проблем, возникающих при исследовании ионосферных провалов. С ними, в частности, столкнулись геофизики, занимавшиеся моделированием ионосферы над Европой в рамках проекта PRIME. Поэтому продолжением этого проекта явился проект COSI 251, одна из секций которого была полностью посвящена исследованию характеристик ГИП, для того, чтобы включить его в модель ионосферы. Проект решено снова продлить и продолжить изучение ионосферных провалов.

Цель работы определили обширный материал спутниковых наблюдений, имевшийся в распоряжении, и актуальность перечисленных выше проблем. Конкретно, были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать статистические характеристики ГИП. В частности, выявить долготный эффект (ДЭ) в положении ГИП, изучить

зависимость его характера от времени суток, сезона и магнитной активности. Исследовать зависимость формы ГИП от долготы, высоты, местного времени, сезона, уровня солнечной и магнитной активности. Выявить вариации вероятности наблюдений ГИП с сезоном, местным временем и долготой. Провести качественный анализ обнаруженных закономерностей, включая асимметрию полушарий, выявить причины расхождений с данными других наблюдений. Отделить от зимнего ГИП более высокоширотный дневной провал, расположенный внутри аврорального овала, не экваториальнее каспа. На основе полученных результатов дать качественную интерпретацию причин образования дневных провалов.

2. Исследовать динамические характеристики ГИП и КИП. Исследовать динамику ГИП для всех фаз интенсивной бури, выявить задержку в реакции ГИП относительно индексов магнитной активности (K_p , Dst и DR). Отделить от ночного ГИП провал, связанный с кольцевым магнитосферным током (КИП). Исследовать динамику КИП для всех фаз магнитосферной бури, выявить задержку в реакции КИП на магнитное возмущение, определить условия формирования КИП, изучить связи с l -током T_e , DR -током магнитосферы и SAR-дугами. Исследовать зависимость динамики ГИП и КИП от местного времени и высоты. Ввести более эффективный индекс магнитной активности $K_p(+)$ для определения положения ГИП. Построить более точную, чем предыдущие, модель положения ГИП на основе $K_p(t)$ -индекса. Провести поиск эффективного индекса магнитной активности для определения положения КИП. На его основе построить модель положения КИП для восстановительной фазы бури.

3. Исследовать статистические характеристики провалов в концентрации ионов He^+ по данным спутника «ISS-b» на высотах 1000-1200 км. Выявить все возможные типы провалов в $[He^+]$ на основе анализа их характеристик. Выявить все возможные типы субпровалов в $[He^+]$. На основе полученных результатов провести качественный анализ причин их образования. Выделить и исследовать зависимость вероятности наблюдения провалов и субпровалов в $[He^+]$ от сезона, местного времени, широты, долготы и магнитной активности. Выделить зависимость положения ПЛИ и субпровалов от K_p -индекса.

4. Определить причины фоновых вариаций параметров ионосферы в области ГИП. Построить глобальное распределение $hmF2$, $NmF2$,

Ne и Te в области провала в северном и южном полушариях для разных условий. Разработать методику для расчета скорости вертикального дрейфа плазмы W из данных по $hmF2$ на основе моделей дневной и ночной ионосферы. Исследовать подходы для решения обратной задачи - определить зonalную и меридиональную компоненты нейтрального ветра из долготных вариаций W . С помощью этой методики оценить вклад солнечной ионизации, а также температуры, состава и ветра нейтральной атмосферы в долготно-широтные вариации $hmF2$ и $NmF2$.

Достоверность полученных в работе результатов основана на огромном статистическом материале, использованном в работе, сравнении с результатами других независимых наблюдений, сравнении экспериментальных данных с модельными расчетами, проведенными в работе, и с другими моделями ионосферы и термосферы (IRI-95, MSIS-93, HWM-93)

Научная новизна работы определяется постановкой и результатами решения следующих проблем:

1. Впервые выделен и детально исследован ионосферный провал (КИП), связанный с кольцевым магнитосферным током, который имеет характеристики, резко отличающие его от ночного ГИП. Обнаружено, что ярко выраженная структура (КИП и связанный с ним пик Te), характерная скорее для максимума интенсивной бури, может появиться на поздней стадии восстановительной фазы бури даже при слабом росте Kp .

2. Впервые выделен и отдельно и детально исследован ионосферный провал, связанный с авроральным каском (зимний дневной провал), который имеет характеристики, резко отличающие его от дневного ГИП. Обнаружена и исследована зависимость положения и вероятности наблюдения ГИП и дневного провала от местного времени, долготы и Kp .

3. Детально исследована динамика ГИП и КИП на всех фазах интенсивной магнитной бури. Выявлена сильная зависимость динамики обоих провалов от местного времени. Обнаружено, что положение КИП, а также задержка τ его реакции относительно изменений магнитной активности зависят от высоты. Построено распределение узких провалов ионизации (УПИ) в координатах местное время - инвариантная широта.

4. Обнаружено, что задержка τ реакции положения ГИП на

изменения магнитной активности зависит от скорости изменений Кр-индекса, а также от местного времени. Введен более эффективный, чем текущий, индекс магнитной активности $K_p(t)$ для определения положения ГИП, который учитывает предысторию развития магнитной активности.

5. Введен DR-индекс магнитной активности (магнитное поле кольцевого тока) для определения положения ГИП и КИП во время резких изменений магнитной активности.

6. Построена гораздо более точная, по сравнению с известными, модель положения ГИП на основе более эффективного $K_p(t)$ -индекса и с учетом зависимости от местного времени и долготы. Построена модель положения КИП для восстановительной фазы бури на основе DR-индекса магнитной активности.

7. Построена вероятностная модель наблюдения ГИП в зависимости от местного времени, сезона, долготы и уровня магнитной активности. Обнаружена зависимость положения ГИП от долготы. Детально исследованы зависимости формы ГИП от высоты, долготы, сезона, местного времени, уровня солнечной и магнитной активности.

8. Построено и детально исследовано глобальное распределение параметров ионосферы (h_mF2 , N_mF2 , N_e , T_e) в ионосфере средних, субавторальных и авторальных широт для разных геофизических условий. При этом выделены элементы глобальной структуры верхней ионосферы, которые исследованы слабо и поэтому inadeкватно воспроизводятся в моделях ионосферы, в том числе и в IRI.

9. Разработана методика для модельных расчетов скорости вертикального дрейфа плазмы W из долготных вариаций h_mF2 . Впервые разработана методика для определения зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра из долготных вариаций W . Сделаны численные оценки вклада состава, температуры и ветра нейтральной атмосферы в долготные вариации параметров ионосферы, основанные на этой методике.

10. Впервые четко отделены друг от друга разные типы провалов в легких ионах: высокоширотный провал, среднеширотный провал (ПЛИ) и более низкоширотные субпровалы. Показано, что субпровал является гораздо более частым явлением, чем считалось ранее.

11. Впервые выделены разные типы субпровалов в легких ионах по механизмам их образования: а) более высокоширотные ($\Phi \geq 47-48^\circ$)

субпровалы, обусловленные динамикой внешней плазмосферы во время возмущений; б) среднеширотные ($\Phi \sim 35-45^\circ$) субпровалы, связанные, в основном, с выносом легких ионов из летнего полушария в зимнее; в) более низкоширотные ($\Phi \leq 35^\circ$) субпровалы, являющиеся проявлением экваториальных «баблов».

12. Обнаружена и исследована зависимость вероятности наблюдения ПЛГ и субпровалов от сезона, местного времени, долготы, широты и магнитной активности. Полученные результаты представляют, фактически, вероятностную модель наблюдения ПЛГ и субпровалов для разных геофизических условий.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Выделение новых элементов глобальной структуры верхней ионосферы с помощью детального анализа их характеристик: а) кольцевого ионосферного провала (КИП), связанного с кольцевым магнитосферным током на ночной стороне Земли; б) дневного ионосферного провала, расположенного в зимней ионосфере полярнее ГИП, но экваториальнее каспа; в) нескольких типов субпровалов в концентрации ионов He^+ , связанных с разными механизмами образования.

2. Результаты исследования статистических характеристик ГИП: обнаружение устойчивого долготного эффекта в положении ГИП и анализ его причин; выделение четкой зависимости формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, магнитной и солнечной активности; построение вероятностной модели наблюдения ГИП в зависимости от сезона, местного времени и долготы.

3. Результаты исследования динамики ГИП и КИП во время интенсивных магнитных бурь: обнаружение зависимости задержки в реакции ГИП на магнитное возмущение от скорости его изменений, обнаружение зависимости положения и реакции КИП на магнитное возмущение от высоты, обнаружение сильной зависимости динамики ГИП и КИП от местного времени, обнаружение в относительно спокойных магнитных условиях структуры, скорее присущей максимуму бури.

4. Эмпирическая модель положения ГИП, гораздо более точная по сравнению с известными, что обусловлено введением эффективного индекса $Kp(t)$ и учетом вариаций положения ГИП с долготой и местным временем. Эмпирическая модель положения КИП для восстановительной фазы бури, основанная на DR-индексе

геомагнитной активности.

5. Обнаружение зависимости вероятности наблюдения провалов и субпровалов в концентрации ионов He^+ от сезона, местного времени, долготы и магнитной активности. Результаты анализа причин этих зависимостей.

6. Разработка методики расчета скорости вертикального дрейфа плазмы W из $hmF2$. Разработка методики выделения зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра из долготных вариаций W . Результаты анализа вклада состава, температуры и ветра нейтральной атмосферы в долготно-широтные вариации параметров ионосферы в области главного ионосферного провала.

7. Построение распределения параметров верхней ионосферы (N_e , Te , $NinF2$ и $hmF2$) на средних, субавроральных и авроральных широтах для разных геофизических условий с учетом новых элементов глобальной структуры. Результаты анализа причин крупномасштабных вариаций параметров верхней ионосферы с помощью численных расчетов и качественного анализа, а также причин больших расхождений эксперимента с моделями термосферы и ионосферы.

Научная и практическая значимость работы определяется, в основном, положениями, которые выносятся на защиту:

- Построено модельное распределение параметров ионосферы ($hmF2$, $NmF2$, N_e и Te) в области средних, субавроральных и авроральных широт для зимних ночных, зимних дневных и летних ночных условий. Получено детальное представление о причинах, формирующих долготно-широтные вариации этих параметров. Сделаны оценки вклада главных причин в эти вариации. Проведено сравнение с существующими моделями, обнаружено наличие больших расхождений с экспериментом, что является основанием для их коррекции.

- Выделены новые элементы глобальной структуры верхней ионосферы. Тем самым открыты новые аспекты ионосферно-плазмосферно-магнитосферных связей, которые подлежат дальнейшему изучению.

- Построена гораздо более точная, чем предыдущие, модель положения ГИП, основанная на эффективном K_p -индексе, учитывающем предысторию, и учете вариаций положения ГИП с долготой и местным временем. Построена модель положения КИП для восстановительной фазы бури, основанная на DR -индексе

геомагнитной активности. Эти модели позволяют резко увеличить точность прогноза состояния ионосферы.

- Выделены вариации вероятности наблюдения ГИП с сезоном, местным временем, долготой и магнитной активностью. Выделены зависимость положения ГИП от долготы, сезона и магнитной активности. Выделены вариации формы ГИП с долготой, высотой, сезоном, местным временем, уровнем солнечной и магнитной активности. Таким образом, заложены основы для построения полной модели ГИП.

- Разработана методика выделения зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра из долготных вариаций $hmF2$. Компоненты нейтрального ветра, рассчитанные по этой методике, более точно воспроизводят вариации $hmF2$, чем компоненты, взятые из модели нейтрального ветра HWM-90. Следовательно, разработанная методика может быть использована также для коррекции моделей нейтрального ветра.

Реализация результатов. Результаты работы использовались при построении глобального отклика ионосферы на магнитную бурю в рамках международного проекта "SUNDIAL", построении модели ионосферы над Европой в европейском проекте "PRIME/COST 251", проведении работ по проблемам физики околоземного пространства в ААНИИ и ИКИ, и отражены в отчетах по гранту Международного научного фонда (J 41100) и грантам РФФИ (№ 94-05-17352-и № 97-05-64085), в которых автор являлся руководителем, а также по выполненной в ИЗМИРАН научно-исследовательской работе «Исследование крупномасштабной структуры ионосферы для спокойных и возмущенных условий на основе глобального картирования ионосферы по данным ИСЗ» (Гос.рег. №01.9.60001815), в которой автор также являлся руководителем.

Личный вклад автора. В диссертации обобщены результаты, основное содержание которых отражено в 38 публикациях. Во всех публикациях автору принадлежит обработка первичной информации, включая создание банка данных спутников "Интеркосмос-19" и "Космос-1809". Во всех публикациях автор участвовал в получении и обсуждении результатов. В большинстве опубликованных в соавторстве работ автору принадлежит также постановка задачи, включая методы решения задачи. В частности, под его непосредственным руководством выполнены два гранта РФФИ и кандидатская диссертация Л.Н.Сидоровой "Статистические

характеристики и механизмы образования пресвалов в концентрации ионов He^+ на высотах верхней ионосферы". В статьях по динамике ГИП, написанных совместно с М.Г.Деминным, С.К.Аннакулиным и В.В.Афониным, вклад соавторов примерно одинаковый. В статьях, написанных совместно с Н.И.Ижовкиной, автору принадлежит экспериментальная часть работы.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзном семинаре по моделированию ионосферы (Звенигород, 1988), на конференции по распространению радиоволн (Ульяновск, 1993), на симпозиумах и семинарах КАПИ (Калуга, 1988, Самарканд, 1989), на семинаре международного проекта SUNDIAL (США, 1989), на международной конференции "Спутниковые исследования ионосферных и магнитосферных процессов" (Москва, 1995), на конференциях Европейского проекта PRIME /COST 251 (Испания, 1992, Австрия, 1994, Чехия, 1996, Германия, 1997) на симпозиуме EGS (Франция, 1994), на международной конференции "Problems of Geocosmos" (Санкт-Петербург, 1996, 1998), на симпозиуме IUGG (Англия, 1999), на симпозиумах COSPAR (Финляндия, 1988, Германия, 1994, Англия, 1996, Япония, 1998, Польша, 2000), на генеральных ассамблеях URSI (Чехия, 1990, Япония, 1993, Франция, 1996), на конференции, посвященной 60-ю ИЗМИРАН (Троицк, 2000).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Общий объем 371 страница, из них текст и 13 таблиц на 239 страницах, 112 рисунков на 116 страницах, список литературы из 318 наименований на 22 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дана общая характеристика работы: обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели работы и основные положения диссертации, которые выносятся на защиту, изложены научная новизна, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора, апробация работы, кратко описано содержание работы по главам.

Первая глава посвящена исследованию статистических характеристик классического ночного ГИП для зимних и равноденственных условий по данным спутников «Интеркосмос-19», «Космос-900» и «Космос-1809». Детально исследованы варианты положения и формы ГИП. В п.1.1 впервые четко выявлен ДЭ в

положении минимума ГИП. Показано, что его амплитуда в среднем составляет 5-6°, а в отдельных случаях может достигать 8-10°, что соответствует изменениям во время интенсивной бури. Амплитуда ДЭ падает с ростом магнитной активности как $A=A_0(1-0.1Kp)$, откуда видно, что ДЭ можно пренебречь во время сильной бури. Вариации положения ГИП с долготой λ можно описать одной первой гармоникой в южном полушарии и двумя – в северном:

$$\Delta\Phi^N = 1.2 \cos(\lambda + 40) + 1.1 \cos(2\lambda - 39) \quad (1)$$

$$\Delta\Phi^S = 2.1 \cos(\lambda + 36) .$$

Асимметрия ДЭ определяет несимметричность положения минимума ГИП в северном и южном полушариях, которая может достигать 3-4°. Показано, что характер ДЭ практически не меняется при переходе от зимних к равноденственным условиям, что является не тривиальным результатом, учитывая большую разницу в освещенности сопряженных полушарий в разные сезоны. Проведен анализ причин образования ДЭ, при этом выделены UT-контроль ионосферы, эффекты центрального ветра, а также влияние параметров геомагнитного поля. Выделен ДЭ в положении пика T_e , связанного с ГИП. Предсказан ДЭ в положении ГДВ и плазмопаузы, а также в экваторе электрического поля магнитосферной конвекции.

В п.1.2 на основе большого статистического материала выделены зависимости инвариантной широты минимума ГИП от Kp-индекса и местного времени t . Линейная зависимость имеет вид:

$$\Phi_{\text{ГИП}} = 65.4 - 2.3 Kp - 0.63t \pm 1.8 , \quad (2)$$

нелинейная зависимость от местного времени выражена полиномом 3-й степени:

$$\Phi(t) = t - 0.1t^2 - 0.01t^3. \quad (3)$$

В п.1.3 впервые построено распределение $NmF2$ в области ГИП, которое адекватно описывает долготно-широтные вариации $NmF2$ и вытекающие из них долготные вариации положения минимума пробела.

Во второй части Главы 1 детально исследованы вариации формы ГИП с долготой (п.1.4.1), сезоном (п.1.4.2), местным временем (п.1.4.3), уровнем магнитной (п.1.4.4) и солнечной (п.1.4.5) активности и высотой (п.1.4.6.). Показано, в частности, что анализ формы ГИП не имеет смысла без учета долготы и полушария, поскольку приводит к противоречиям (п.1.4.1). Точно так же, проблему изменений формы ГИП с ростом магнитной активности нельзя решить простым

усреднением данных: хотя с ростом K_p провал в среднем становится глубже и уже, ситуация зависит от того, как развиваются положительная и отрицательная фазы бури на стенках и в минимуме ГИП (п.1.4.4). При низкой солнечной активности ГИП гораздо ярче выражен, чем при высокой, это единственный вывод, с которым согласны все исследователи (1.4.5). Показано также, что при низкой солнечной активности форма ГИП в гораздо большей степени, чем при высокой активности, определяется динамикой ионосферы, связанной с возмущениями. В результате форма ГИП при низкой солнечной активности сильно изменяется с высотой (п.1.4.6).

Итак, большой массив данных спутников «Интеркосмос-19», «Космос-900» и «Космос-1809» позволил провести всесторонний анализ характеристик ГИП и выделить целый ряд новых закономерностей. Принципиально важным среди них является обнаружение сильного ДЭ в положении и форме провала. Выделение ДЭ в положении ГИП позволяет уменьшить разброс данных и построить более точную, чем существующие, модель провала для стабильных геомагнитных условий. Решение этой задачи является критичным для проблемы прогноза состояния ионосферы высоких широт. Обнаружение зависимости формы ГИП от долготы и полушария позволяет устранить целый ряд противоречий, существовавших более 30 лет между разными исследованиями, и вплотную подойти к построению модели формы ГИП. Решение этой задачи критично для проблемы моделирования субавроральной ионосферы. Полученные результаты довольно сильно меняют наши представления о физических механизмах, действующих в области ГИП.

Во второй главе на основе статистического анализа большого массива однородных данных спутника «Космос-900» (~3000 витков) впервые детально исследованы вариации вероятности P наблюдения ГИП. Изучение суточных вариаций P в п.2.2 показывает, что восход и заход Солнца четко делят земный провал на ночной ($P \sim 95\%$) и дневной ($P \sim 30\%$). После захода Солнца (в 17-19 LT) и в утренние часы (в 3-5 LT) обнаруживаются пики вероятности P , на которые ранее не обращали внимания. Рассмотрены причины их образования.

Анализ годовых вариаций величины P , проведенный в п.2.3, показывает, что провал ионизации является стабильной ($P \sim 90-95\%$) характеристикой ночной зимней субавроральной ионосферы. В зимних дневных и летних ночных условиях вероятность P снижается в среднем

до ~ 30% и сильно перераспределяется с долготой.

Поэтому в п.2.5 были выделены вариации P с долготой и обнаружено, что в летних ночных спокойных условиях высокой солнечной активности ГИП регулярно фиксируется только в минимуме фоновой концентрации, т.е. на долготах $210-270^\circ$ в северном полушарии ($P \sim 55\%$) и на долготах $30-60^\circ$ в южном полушарии ($P \sim 85\%$). Провал лучше выражен в южном полушарии, где тень глубже и уровень фоновой концентрации ниже. Впервые выделена зависимость вероятности наблюдения ГИП от магнитной активности в летних ночных условиях (п.2.5): в области тени ГИП существует всегда ($P = 100\%$) уже при $K_p \sim 5$, а на освещенных долготах хорошо выраженный провал начинает появляться только при $K_p \sim 3-4$. Во время сильной бури провал существует на всех долготах, что безусловно связано с быстрым дрейфом под действием электрического поля. В спокойных условиях на освещенных долготах можно зафиксировать только квазипровал, который является реликтом провала, образованного ранее в области тени или при повышенной магнитной активности. Полученные результаты позволяют также объяснить причины сильных противоречий между данными разных экспериментов.

В п.2.4 впервые построено распределение параметров ионосферы в области летнего ночного провала, адекватно учитывающее долготно-широтные вариации Ne . Детально исследованы их причины. Показано, что ДЭ является устойчивой характеристикой ночной летней ионосферы средних и высоких широт. ДЭ больше по амплитуде ($4-4.5$) и проще по форме (имеет один максимум) в южном полушарии, слабее ($4 \sim 2-3$) и сложнее по форме (имеет два максимума) в северном полушарии. Долготные вариации Ne изменяются с широтой по форме, амплитуде и фазе. Это в свою очередь определяет характер широтных изменений электронной концентрации. Выделено четыре типа поведения Ne с широтой, каждый из которых присущ данному долготному сектору в данном полушарии: а) фоновое (монотонное) падение Ne от 40° до 70° ; б) рост Ne относительно фона на средних ($\sim 55^\circ$) широтах, который сменяется резким падением концентрации к авроральному овалу ("cliff" ионизации); в) падение Ne в области ГИП; г) аномальное поведение концентрации, при котором она практически не меняется по величине с ростом широты от 40° до 70° . Последнее, например, наблюдается на долготах $195-210^\circ$ в северном полушарии. Гребень или «cliff» ионизации был обнаружен

только на долготах 240-300° южного полушария. Анализ показывает (п.2.6), что образование этой структуры обусловлено согласованным действием нескольких причин, среди которых важную роль играет нейтральный ветер.

В п.2.7 построено распределение Te в области ГИП и впервые четко выделены устойчивые долготные вариации Te во внешней ионосфере средних и высоких широт для ночных летних условий. Амплитуда ДЭ достигает ~ 40% на субавроральных широтах южного полушария. Пик Te образуется только на долготах провала. Сравнение показало, что долготные вариации Te неадекватно отражены для рассматриваемых условий в модели IRI. Исследованы причины вариаций Te . Обнаружено, что на неосвещенных средних широтах долготные вариации Te и Ne не противофазны, как это следует из существующих представлений, а синфазны и подобны изменениям магнитного склонения.

Итак, впервые детально исследованы вариации вероятности P наблюдения ГИП в зависимости от времени суток (для зимних условий), сезона (для ночных условий), долготы (для летних ночных условий) и магнитной активности (для освещенных и неосвещенных долгот). Впервые построено распределение параметров ионосферы в области летнего ночного провала, адекватно учитывающее долготно-широтные вариации Ne и Te . Выявлены их причины. Впервые для этих условий четко выделена сильная зависимость всех характеристик провала от долготы. Полученные результаты позволили уточнить механизмы образования провала ионизации в летних ночных условиях.

В третьей главе детально исследована структура дневной зимней высокоширотной ионосферы. В п.3.1 кратко проанализированы характеристики высокоширотного провала ионизации, который рассматривался только как «помеха» при выделении других провалов. Дальнейший анализ (п.3.2) показал, что чрезмерно большой разброс данных в дневных зимних условиях связан с наличием двух типов провала. *Дневной ГИП* по форме и по локализации относительно аврорального овала похож на ночной ГИП, но расположен на более высоких широтах $\Phi=63-74^\circ$. Он, как правило, образуется в области тени и поэтому чаще всего регистрируется на долготах 120-180° в северном полушарии ($P \sim 60\%$) и на долготах 270-330° в южном полушарии ($P \sim 80\%$), а реже всего на освещенных долготах ($P=10-20\%$)

и в послеполуденные часы ($P=10-40\%$). Второй *зимний дневной провал* имеет характерную форму с крутой экваториальной стенкой и плохо развитой полярной стенкой. Он *наблюдается*, в основном, на освещенных Солнцем долготах и чаще фиксируется в полдень ($P\sim 60\%$ в южном и $P\sim 40\%$ в северном полушарии). Второй провал в полдень оказывается внутри аверсального овала, но экваториальнее каспа. Вероятность наблюдения второго *дневного провала* достигает $\sim 50\%$ и $\sim 30\%$ на освещенных долготах и падает в тени до 0% и $\sim 20\%$ в северном и южном полушариях соответственно. Выделена также зависимость P от магнитной активности: вероятность наблюдения дневного ГИП (в области тени) падает с ростом магнитной активности, а вероятность наблюдения второго дневного провала (на освещенных долготах) растет.

Наличие сильной асимметрии в зимней высокоширотной ионосфере обсуждается в п.3.3. Асимметрия выражается в разной зависимости вероятности появления, конфигурации и локализации провалов от долготы, местного и мирового времени, а также магнитной активности. В результате распределение электронной концентрации в зимней дневной высокоширотной ионосфере разных полушарий будет сильно отличаться для разных моментов местного и мирового времени. Иначе говоря, долготный эффект и UT-контроль высокоширотной ионосферы носят разный характер в разных полушариях.

В п.3.4 было проведено сравнение положения дневного провала с положением других структур. Положение минимума дневного провала в дополуденном секторе совпадает с положением втекающих в ионосферу продольных токов зоны 2, а также с областью сильных электрических полей. Полярная стенка этого провала совпадает с полосой высыпаний частиц в области каспа. Полученные результаты позволяют четко определить наиболее вероятные механизмы формирования дневных провалов – а.3.5. ГИП образуется в результате распада ионизации в области полной тени, где все сутки нет источников ионизации. Более высокоширотный дневной провал, так же как и ночной ГИП, формируется в области стагнации в вечернем секторе, но в отличие от него выносится западным дрейфом в дневной сектор, где поддерживается действием электрических полей и продольных токов. Дополнительной причиной является электростатическая неустойчивость плазмы, как показывают расчеты, сделанные в работах [Исжовкин, Карачев и др., 1996, 1999].

Сравнение показало также, что во всех работах положение дневного провала, как правило, совпадает либо с ГИП, либо с более высокоширотным провалом, т.е. провалы всегда путают друг с другом.

Анализ, проведенный в п.3.6.1, показывает, что ДЭ проявляется не только в вероятности наблюдения, но и в положении дневного ГИП. При этом долготные вариации положения минимума ГИП в дневных условиях достигают по амплитуде $4-5^\circ$, что несколько меньше, чем ночью ($5-6^\circ$). Характер ДЭ разный в разных полушариях. В южном полушарии он слабо изменяется с течением суток (в основном, по фазе, менее сильно по амплитуде и слабо по форме), а в северном полушарии наиболее сильно изменяется форма ДЭ – п.3.6.3.

Долготные вариации положения обоих провалов следует рассматривать в рамках изменений конфигурации провала в целом, т.е. формы, ширины и глубины всей структуры, которые определяются вариациями электронной концентрации на полярной и экваториальной стенках провала – п.3.6.2. Эти вариации определяются многими факторами, и, в первую очередь, изменениями зенитного угла Солнца и характеристик нейтрального ветра, обусловленными разницей между положением геомагнитного и географического полюсов, а также долготными изменениями характеристик геомагнитного поля (величины, склонения и наклонения).

В п.3.7 впервые построено распределение Ne для высот 380-490 км в зимней дневной ионосфере средних и высоких широт, которое адекватно учитывает долготно-широтные вариации параметров ионосферы, включая вариации положения и формы ионосферных провалов, а также асимметрию полушарий. Анализ показывает, что все эти вариации никак не отражены в модели IRI.

Итак, детальный анализ большого массива данных «Космос-900» позволил выделить новую структуру зимней дневной ионосферы – «дневной» провал ионизации, который со времени обнаружения его Малдрью в 1965 г. путали с дневным ГИП. Это позволило четко выделить характеристики обоих провалов, в частности, вариации вероятности наблюдения, положения и формы с долготой. С учетом результатов Главы 2, можно говорить о достаточно полной картине вероятности наблюдения ГИП в разных геофизических условиях, иначе говоря, о вероятностной модели ГИП. Полученные результаты позволяют также гораздо более уверенно говорить о механизмах образования обоих дневных провалов.

В четвертой главе детально исследована динамика СИП в период интенсивных бурь и на основе выделенных при этом закономерностей построены более точные, чем известные, модели положения провалов. Для этого рассмотрено около 50 бурь по данным «Космос-900» и «Интеркосмос-19» для ночных зимних и равноденственных условий. Построена качественная картина динамики провалов и пиков T_e во время возмущений (п.4.2). Проведено разделение СИП на ГИП, расположенный вблизи ГДВ, и КИП (кольцевой ионосферный провал), наблюдающийся на широтах кольцевого тока. Показано, что во время бури изменения положения ГИП в целом опережают изменения Dst-индекса и отстают от изменений Kp-индекса с характерным временем задержки τ (п.4.1 и 4.2). Время τ тем больше, чем больше скорость изменений Kp:

$$\tau = -0.4 + 4.3 \Delta Kp / \Delta t. \quad (4)$$

В п.4.3 построена вдвое более точная, чем известные, модель положения ГИП для фазы роста магнитной бури. Для этого введен более адекватный, чем Kp или Dst, индикатор магнитной активности для положения провала - магнитное поле кольцевого тока DR, выявлена зависимость задержки по времени τ от местного времени t и учтен скачок в положении ГИП при $DR=150-155$ нТл введенным коэффициентом A:

$$\Phi_{\text{гип}}(DR, t) = 70 - [20 - A DR(-\tau) - 0.005 DR(-\tau)^{0.5} \pm 1.2; \quad r = 0.96; \quad (5)$$

$$\tau = 0.75 + 0.25 \operatorname{th}(2t + 4);$$

$$A = 3.1 + 0.9 \operatorname{th}(2t + 4), \quad \text{при } DR(-\tau) > -155;$$

$$A = 3.75 + 0.25 \operatorname{th}(2t + 4), \quad \text{при } DR(-\tau) < -150.$$

В п.4.4 построена втрое более точная, чем известные, модель положения ГИП для восстановительной фазы интенсивной бури на основе DR-индекса:

$$\Phi_{\text{гип}}(DR, t, \lambda) = \Phi_{\text{гип}}(0, t, \lambda) - \Phi_{\text{гип}}(t) \exp[0.009 DR] \pm 1.5.$$

В этой модели $\Phi(\lambda)$ определяется соотношениями (1), $\Phi_{\text{гип}}(t) = 41.5 - 0.5\Phi(t)$, t отсчитывается от полуночи, $\tau = 1$, $r=0.96$. С учетом этой зависимости в п.4.4 построена модель положения КИП для восстановительной фазы бури также на основе DR-индекса:

$$\Phi_{\text{кип}}(DR, t, \lambda) = \Phi_{\text{гип}}(DR, t, \lambda) \text{ при } DR \leq DR_0; \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{кип}}(DR, t, \lambda) = \Phi_R(0) + [\Phi_{\text{гип}}(DR, t, \lambda) - \Phi_R(0)] (DR/DR_0)^2 \quad \text{при } DR \geq DR_0, \quad \text{где } \Phi_R(0) = 56^\circ, DR_0 = -100.$$

Наконец, в п.4.5 получена не менее точная эмпирическая формула

для положения ГИП для любого уровня магнитной активности. Это достигнуто путем введения эффективного индекса магнитной активности $K_p^*(\tau)$, который учитывает предысторию.

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{Гип}}(t, K_p^*, \lambda) &= 70 - 3.4 \sqrt{K_p^{*2} + 3} - \Phi(t) - \Phi(\lambda) \exp(-0.3 K_p^*) \pm 1.6; \\ K_p^*(T, \tau) &= 2.1 \ln[0.2 a_p(T, \tau) + 1], \\ a_p(T, \tau) &= [1 - \exp(-3/\tau)] \sum a_p(T - 3n) \exp(-3n/\tau), \\ \tau &= 5 + 1.5 \operatorname{th}(2t + 4),\end{aligned}\tag{7}$$

где T - мировое время; $n = 0, 1, 2, \dots, a_p(T), a_p(T-3), \dots$ - значения a_p за данный трехчасовой интервал, за предыдущий трехчасовой интервал и т.д.

Итак, на основе анализа нескольких десятков интенсивных бурь построена картина динамики СИП для всех фаз бури и разных секторов ночного времени. Дана качественная интерпретация отдельным деталям этой картины. От ГИП отделен КИП, выявлена зависимость времени задержки τ реакции ГИП от скорости изменений магнитной активности, введен эффективный индекс $K_p(\tau)$, введен индекс DR, на их основе построены в 2-3 раза более точные, чем существующие модели ГИП, впервые построена модель КИП. Эти результаты принципиально меняют ситуацию с динамикой провалов и моделями положения провалов во время резких изменений магнитной активности.

В пятой главе на основе данных спутников «Интеркосмос-19», «Космос-900», «Космос-1809» и «ISS-b» впервые детально исследованы характеристики КИП. КИП впервые был четко отделен от ГИП по данным «Космос-1809» для летних ночных условий низкой солнечной активности (п.5.1.1). Наиболее полная на настоящий момент картина динамики КИП для зимних ночных условий высокой солнечной активности получена в п.5.1.2 по данным «Космос-900». Показано, что на восстановительной фазе интенсивной ($K_p > 4$) бури КИП находится на характерных широтах остаточного кольцевого тока ($L \sim 3$, $\Phi \sim 55^\circ$), что на $10-15^\circ$ экваториальнее ГИП (и ГДВ). КИП существует в течение 8-10 ч в вечернем секторе и до 30 ч в утреннем секторе, затем еще примерно сутки на широтах остаточного кольцевого тока может наблюдаться пик Те. Наиболее ярко, в виде узкого провала ионизации (УПИ), КИП проявляется в послеполуночных зимних условиях. Получено распределение УПИ в координатах местное время - инвариантная широта. Показано, что в вечернем секторе УПИ

является ГИП, и связан с развитием поляризованного джета на фазе роста бури. В утреннем секторе УПИ, как правило, появляется на восстановительной фазе бури на широтах остаточного кольцевого тока и поэтому является КИП.

В п.5.1.2 выявлена также сильная зависимость динамики ГИП и КИП от местного времени. В вечернем секторе на фазе роста бури ГИП может скачком переходить в КИП. КИП вечером выражен плохо, существует недолго и также скачком переходит в ГИП на фазе восстановления. В околополуденные часы ГИП и КИП на восстановительной фазе бури могут достаточно долго существовать одновременно. В утреннем секторе на фазе роста бури экваториальное ГИП также может образоваться КИП. Утром КИП более ярко выражен, чем ГИП, существует намного дольше, чем вечером, и также скачком переходит в ГИП.

Анализ данных спутника «ISS-b» для высот 1000-1200 км обнаруживает четко выраженный КИП в концентрации легких ионов H^+ и He^+ (п.5.1.3).

В п.5.2 проведен анализ динамики КИП и связанного с ним пика Te во время бури 29-30 марта 1979 г. по одновременным данным спутников «Интеркосмос-19» и «Космос-900». Обнаружено, что с ростом высоты от ~450 до ~950 км вся структура смещается на ~0.7° к экватору. Обнаружено, что изменения положения структуры задержаны относительно изменений Кр-индекса на 1-1.2 ч на больших высотах внешней ионосферы (~950 км) и на 2.1-2.6 ч на высотах вблизи максимума слоя F2 (~430 км). Разница 1-1.5ч обусловлена характерным временем перестройки структуры плотной плазмы вблизи максимума слоя F2. Выделена слабая зависимость положения КИП и пиков Te от долготы. Таким образом, несопряженность структуры в северном и южном полушариях на одной и той же высоте определяется, в основном, долготным эффектом и редко отличается больше чем на 0.5°. Положение КИП определяется DR-индексом:

$$\Phi_{кип} = 57.8 + 0.052 DR \quad (8)$$

и характеризуется даже в линейном приближении чрезвычайно малым разбросом данных ($\pm 0.2^\circ$) и очень высоким коэффициентом корреляции ($r \sim 0.96$).

В п.5.3 выявлены статистические характеристики КИП. Показано, что КИП наиболее часто наблюдается в 2-3 LT (п.5.3.1). В п.5.3.2 построена картина поведения КИП в терминах Кр-индекса отдельно

для до- и послеполуночных условий, для фазы роста и фазы восстановления бури. Эта картина отражает практически все обсуждаемые характеристики КИП. Показано, в частности, что вблизи максимума бури положение КИП коррелирует с K_p -индексом, хотя и не так сильно, как положение ГИП, а в целом зависимость от K_p слабая.

Статистический анализ не выявил сильной зависимости от долготы положения КИП – п.5.3.3. Что касается зависимости от местного времени, то она не отличается от аналогичной зависимости для ГИП (и плазмопаузы) в максимуме бури и становится слабой на поздней стадии восстановительной фазы бури – п.5.3.3.

Для того, чтобы понять причины образования КИП в п.5.4.1, было проведено сравнение с данными других измерений. Сравнение четко показывает, что КИП, пик $T_e > 3000^\circ$, кольцевой ток и SAR-дуга связаны. Полученные результаты позволяют однозначно заключить (п.5.4.2), что КИП образуется во время интенсивной магнитной бури в результате взаимодействия горячих ионов кольцевого магнитосферного тока с холодными электронами внешней плазмосферы. Эти же процессы определяют развитие SAR-дуги, поэтому КИП всегда связан с интенсивным пиком T_e .

Наконец, в п.5.4.3 приведено два примера появления на поздней стадии восстановительной фазы ярко выраженной структуры (КИП и связанного с ним пика T_e), присущей скорее максимуму интенсивной бури. Предложен возможный механизм образования этой структуры, связанный с ионно-циклотронными волнами.

Итак, на основе большого массива данных нескольких спутников впервые четко выделена новая структура ночной ионосферы – кольцевой ионосферный провал (КИП). Детально исследованы его характеристики. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что КИП образуется во время интенсивной магнитной бури в результате взаимодействия горячих ионов кольцевого магнитосферного тока с холодными электронами внешней плазмосферы.

В шестой главе на основе системного анализа большого массива данных спутника «ISS-b» разработана методика выделения разных типов провалов в концентрации ионов He^+ на высотах верхней ионосферы: 1000-1200 км – п.6.1. С помощью этой методики четко классифицированы высокоширотные провалы, среднеширотные провалы (ГЛИ) и субпровалы разных типов. Это позволило детально

исследовать их характеристики. В частности, впервые выделены вариации вероятности наблюдения ПЛИ и субпровалов.

В п.6.2. выделены и детально исследованы сезонные вариации вероятности P наблюдения ПЛИ и субпровалов для ночных (6.2.1) и дневных (6.2.2) условий. Главной особенностью в поведении ПЛИ оказалось наличие четко выраженных равноденственных пиков в величине P . Против ожидания также и то, что в ночных зимних условиях вероятность наблюдения ПЛИ не намного больше, чем в летних, и составляет всего ~50%. Для объяснения выявленных закономерностей в п.6.2 выделены также и детально исследованы сезонные вариации $[He+]$, поскольку в моделях ионосферы они представлены неадекватно. Разработана качественная схема, по которой эти вариации определяют вариации величины P . В свою очередь вариации $[He+]$ оказались в сильной зависимости от вариаций $[O+]$. Проанализирован механизм этой связи.

В п.6.3 выделены и детально исследованы суточные вариации вероятности наблюдения ПЛИ и субпровалов для зимних (6.3.1) и летних (6.3.2) условий. Вероятность наблюдения ПЛИ и зимой и летом достигает максимума (~50%) в ночных условиях и обнаруживает при этом два пика – до- и послеполуночный. Показано, что эти пики определяются соответствующим поведением $[O+]$, которое, так же как и в случае сезонных вариаций, почти полностью определяет поведение $[He+]$.

В п.6.4 по аналогичной схеме выявлены и детально исследованы долготные вариации вероятности наблюдения ПЛИ и субпровала в $[He+]$ для ночных зимних и летних условий в северном и южном полушариях. Точно так же были выделены долготные вариации $[He+]$ и показана их связь с долготными вариациями $[O+]$. Оказалось, что зимой долготные вариации $[He+]$ и $[O+]$ на средних широтах коррелируют, а летом – антикоррелируют. Показано, что это связано с соответствующими изменениями высоты слоя $[He+]$. Поскольку причины долготных вариаций $[O+]$ изучены, это означает, что теперь известны и причины вариаций $[He+]$.

Для сезонных, суточных и долготных вариаций вероятности наблюдения субпровалов была обнаружена общая закономерность: субпровалы появляются тем чаще, чем ниже фоновая концентрация $[He+]$.

В п.6.5 исследуется зависимость характеристик ПЛИ и субпровалов от магнитной активности. В п.6.5.1 выделена зависимость положения

ПЛИ и субпровалов от Кр-индекса. Для этого субпровалы были разделены на высокоширотные ($\Phi \geq 48-49^\circ$), связанные с динамикой внешней плазмосферы, а также средне- и низкоширотные ($\Phi \leq 48-49^\circ$), сформированные во внутренней плазмосфере. Показано, что ПЛИ расположен вблизи внутренней плазмоспаузы и вместе с ней смещается к экватору при увеличении магнитной активности согласно выявленной зависимости:

$$\Phi_{\text{ПЛИ}} = 65.0 - 2.0 K_p \pm 2.2. \quad (9)$$

Положение высокоширотных субпровалов от магнитной активности зависит слабо, а низкоширотных – не зависит. Исследованы также вариации формы ПЛИ в зависимости от магнитной активности, показано, что они не приводят к сильным изменениям вероятности P .

Полученные результаты и дополнительный анализ, проведенный в п.6.6, позволяют делать обоснованные выводы относительно механизмов образования субпровалов. В п.6.6.1 показано, что наиболее вероятными причинами формирования высокоширотных ($\Phi \geq 47-48^\circ$) субпровалов в дневное время являются так называемые «оторванные плазменные облака», а в ночные часы – механизм, образующий КИП на более низких высотах. Этот вывод основан, в частности, на анализе вероятности распределения субпровалов с местным временем (п.6.6.1), которое показывает наличие двух максимумов – ночного и дневного. Небольшой рост P в вечернем секторе, очевидно, связан с развитием полярizationsного джета.

В п.6.6.2 показано, что низкоширотные субпровалы ($\Phi \leq 35^\circ$) наблюдаются в зимних ночных условиях и не регистрируются летом. Их характеристики очень похожи на характеристики экваториальных баблов (плазменных пузырей). Баблы поднимаются над экватором на высоты до 3000 км, в результате чего они проявляются как субпровалы на широтах $20-35^\circ$ на ионосферных высотах ~ 1100 км.

В п.6.6.3 рассмотрены среднеширотные субпровалы, которые формируются в промежуточной полосе широт ($35-45^\circ$). В возмущенные периоды времени они связаны со всплесками электрических полей магнитосферного происхождения, которые регулярно наблюдаются вблизи $L \sim 2$ в вечерние и послеполуночные часы. В спокойные периоды времени среднеширотные субпровалы образуются в результате выноса легких ионов из летнего полушария в зимнее. Схема этого процесса детально разработана, в частности, показано, что он

наиболее эффективно протекает на освещенных долготах южного полушария в интервале местного времени 14-22 LT. В зимнем полушарии на сопряженных широтах образуется довольно значительное повышение $[H^+]$.

В процессе анализа были сделаны также довольно существенные уточнения механизмов образования ПЛИ. Например, четко показано, что минимум ночного ПЛИ образуется под действием процессов опустошения и заполнения силовых трубок внешней плазмосферы. Дневной зимний ПЛИ является реликтом ночного ПЛИ. Дневной летний провал формируется при образовании оторванных плазменных облаков на восстановительной фазе бури и при росте концентрации в области его полярной стенки относительно минимума концентрации. Последнее определяется разным характером сезонных вариаций $[He^+]$ на экваториальной и полярной стенках ПЛИ вследствие конкуренции между «winter bulge» и полярным ветром.

Кроме того в п.6.6.3 рассмотрена зависимость вероятности наблюдения субпровалов от Кр-индекса для ночных зимних и дневных летних условий. Полученные закономерности хорошо укладываются в общую картину образования субпровалов, выделенную выше.

Итак, впервые четко проведена классификация провалов в легких ионах на основе детального исследования их характеристик. Впервые построена количественная картина вероятности наблюдения ПЛИ и субпровалов. Сделаны существенные уточнения механизмов образования ПЛИ. Рассмотрены или предложены наиболее вероятные механизмы формирования субпровалов разных типов.

В седьмой главе построена достаточно полная картина фоновых вариаций параметров ионосферы в области ГИП, определены главные действующие факторы и сделаны оценки их вклада в долготно-широтные вариации $hmF2$ и $NmF2$. Для этого построено распределение высоты максимума слоя F2 в области ионосферного провала на примере летних ночных условий и выделены относительно устойчивые долготные вариации высоты слоя F2 – п.7.1. Изменения $hmF2$ с долготой в летней околополуденной среднширотной ионосфере составляют по величине ~70 (45) км в геомагнитной и ~60 (35) км в географической системе координат в южном (северном) полушариях соответственно. Характер долготных вариаций $hmF2$ слабо изменяется с ростом инвариантной широты вплоть до аврорального овала, максимальные изменения связаны со сдвигом фазы на запад.

В п.7.2 разработана методика для расчета долготных вариаций скорости вертикального дрейфа плазмы W из данных по $h_m f^2$. Для этой цели адаптированы две модели ионосферы – серво-модель (п.7.2.1), основы которой были заложены Ринбетом, и модель ИЗМИРАН (п.7.2.2), разработанная, в основном, Деминским. С помощью объединенной модели и модели термосферы MSIS рассчитаны долготные вариации W :

$$W = D_m \sin^2 I / (2H) \{ \exp[(h_m - h_{mo})/H] - \exp[-k(h_m - h_{mo})/T_i] \} \quad (10)$$

а также высоты баланса h_{mo} для фиксированных инвариантных (п.7.2.3) и географических широт (п.7.2.4) 40° в северном и южном полушариях. Определен вклад ветра, а также температуры и состава термосферы в долготные вариации $h_m f^2$, который определяется вариациями высоты h_{mo} баланса между процессами диффузии и рекомбинации:

$$h_{mo} = h_0 + c_1 T_n \{ \ln([O]_0 \beta_0 T_n^2 (T_n + T_i)^{1/2} / [(T_e + T_i) \sin^2 I]) - c_2 \}, \quad (11)$$

где c_1 и c_2 константы, $h_0 = 300$ км, I – наклонение геомагнитного поля, β_0 – коэффициент рекомбинации на высоте h_0 . Полученные результаты позволяют также понять причины асимметрии полушарий (п.7.2.5).

В п.7.3 впервые решена обратная задача – по вариациям W с долготой λ определены меридиональная V и зональная U компоненты нейтрального ветра с точностью до первой гармоники:

$$V = V_0 + V_c \cos \lambda + V_s \sin \lambda, \quad (12)$$

$$U = U_0 + U_c \cos \lambda + U_s \sin \lambda.$$

Для этого разработана методика, основанная на разложении в конечный ряд Фурье долготных вариаций W , параметров геомагнитного поля, а также скорости ветра. Решение получающейся при этом системы алгебраических уравнений проводилось двумя методами – классическим методом с добавленными из физических соображений уравнениями (п.7.3.2) и методом регуляризации Тихонова (п.7.3.3). Метод регуляризации позволяет найти решение v^* системы из 7 уравнений с 6 неизвестными:

$$\|Av^* - w\| = \min_{v^* \in R^n} \|Av - w\|, \quad (13)$$

здесь $\|v\| = \{\sum_{j=1}^n v_j^2\}^{0.5}$ – Евклидова норма, $n = 7$, w – вектор скорости

дрейфа, A – матрица размера 7×6 , элементы которой зависят только от

параметров магнитного поля. При этом наиболее точно определяется среднее значение меридиональной компоненты ветра V_0 , менее точно – ее долготные вариации и среднее значение зональной компоненты U_0 , наименее точно – долготные вариации последней. Сравнение, проведенное в п.7.3.5, показывает, что полученные решения более адекватно воспроизводят долготные вариации скорости обеих компонент ветра для рассматриваемых условий, чем модель нейтрального ветра НВМ-90, основанная на прямых измерениях. Таким образом, разработанная методика может быть использована для коррекции модели нейтрального ветра при наличии точных измерений hmF2. В п.7.3.6 реализована главная цель данной главы – сделаны оценки вклада разных факторов в долготные вариации hmF2.

Таблица 7.4. Вклад (в %) разных компонент ветра в долготные вариации скорости дрейфа W для инвариантных (Φ) и географических (φ) широт $\pm 40^\circ$

Широта	V_0	V_ϵ	V_s	U_0	U_ϵ	U_s
$40^\circ\Phi$	10	18	37	29	3	3
$40^\circ\varphi$	27	6	22	34	1	10
$-40^\circ\Phi$	9	33	11	33	3	11
$-40^\circ\varphi$	17	28	2	32	4	18

Вклад долготных вариаций температуры нейтральной атмосферы составляет 20-25%, а вертикального дрейфа плазмы W под действием нейтрального ветра 75-80%. При этом изменения составляющих термосферы (O и N_2) с долготой (в обеих системах координат) практически взаимно компенсируются. Вклад долготных вариаций T_e незначителен. В свою очередь, долготные вариации W определяются на ~15% действием V_0 , 40% - долготными вариациями скорости меридионального ветра, 32% - U_0 и на 12% - долготными вариациями скорости зонального ветра. Действие V_0 сильнее в географической системе координат, поскольку определяется сильными вариациями с долготой величины $\cos D \sin 2l$. Эффект U_0 стабилен и определяется долготными вариациями $\sin D$ в обеих системах координат.

В п.7.5 расчеты были повторены для всех широт ГИП. Для этого дополнительно была адаптирована модель дневной ионосферы, разработанная в ИЗМИРАН Ю.С.Ситновым, В.Н.Шубиным и С.К.Аннакулисым. Расчеты показали, что среднее значение скорости

меридионального ветра V_0 увеличивается с ростом широты от 40° до 65° примерно в два раза, однако произведение $V_0 \cdot \cos D \cdot \sin 2I$ практически не меняется, поэтому вклад меридионального ветра в долготные вариации остается примерно постоянным. Направление и скорость зональной компоненты изменяются с широтой нерегулярно, поэтому изменения ее вклада оценить трудно.

В п.7.4 аналогичные расчеты W проведены из данных по $NmF2$ для $40^\circ\Phi$. Долготные вариации $NmF2$ в неосвещенной среднеширотной ионосфере определяются в основном величиной остаточной ионизации N_0 (на заходе Солнца) и временем ее распада под действием процесса рекомбинации. Нейтральный ветер вносит меньший вклад.

Наконец, в п.7.6 расчеты W проведены для широты $65^\circ\Phi$. Долготные вариации $NmF2$ в освещенной высокоширотной ионосфере определяются вариациями скорости вертикального дрейфа плазмы, уровня солнечной ионизации, температуры термосферы и концентрации N_2 в примерном соотношении 50:36:6:6.

Итак, построена достаточно полная картина фоновых вариаций параметров ионосферы в области ГИП, определены главные действующие факторы и сделаны оценки их вклада в долготно-широтные вариации $hmF2$ и $NmF2$. Удалось также впервые решить обратную задачу – выделить меридиональную и зональную компоненты нейтрального ветра из долготных вариаций $hmF2$.

Заключение. Основные результаты каждого этапа работы приведены в выводах к каждой главе, поэтому в Заключении они сформулированы в обобщенном виде и для удобства восприятия сгруппированы в рамках отдельных направлений исследований.

1. На основе детального анализа большого массива данных нескольких спутников выделены новые элементы глобальной структуры верхней ионосферы:

- Впервые от ночного ГИП четко отделен «кольцевой ионосферный провал» (КИП), связанный с кольцевым магнитосферным током.

- Впервые в зимних условиях четко выделена ветвь «дневного» ионосферного провала, расположенного южнее ГИП, но экваториальнее аврорального каспа.

- Впервые выделено несколько типов субпровалов в концентрации ионов He^+ на высотах 1000-1200 км. Вопреки литературным данным, субпровалы являются достаточно стабильным элементом верхней ионосферы.

2. Проведена более полная и точная классификация ионосферных провалов, для чего разработана методика разделения провалов разных типов на основе системного подхода к большому массиву спутниковых данных. Выявлены и устранены причины разброса данных в положении провалов, что позволило гораздо более четко локализовать их в пространстве. Проведено сравнение с данными других измерений и вскрыты причины методических ошибок при идентификации провалов, приводящие к большим расхождениям в результатах исследований.

3. Получена практически полная количественная картина (модель) вероятности наблюдения ионосферных провалов разных типов. Для этого выделены и детально исследованы зависимости вероятности наблюдения ГИП от сезона, местного времени, долготы, уровня магнитной и солнечной активности. Показано, в частности, что вероятность P наблюдения ГИП в летних ночных и зимних дневных условиях составляет в среднем $\sim 30\%$ и очень сильно перераспределяется с долготой – до 80-90% в области тени и до 10-20% на освещенных долготах. Впервые выделены все эти зависимости для ПЛИ и субпровала. Показано, в частности, что для ПЛИ $P \sim 40-50\%$ как в ночных зимних, так и летних условиях, и достигает 80% во время весеннего равноденствия. Впервые выделены зависимости величины P от долготы и MLT для «дневного» зимнего провала. Показано, что КИП чаще всего наблюдается утром.

4. Обнаружен и исследован ДЭ в положении минимума ГИП и пика T_e с амплитудой $5-6^\circ$. ДЭ несимметричен в северном и южном полушариях, поэтому несопряженность в положении ГИП может достигать $3-4^\circ$. Предсказан ДЭ в положении плазмопаузы и ГДВ ($2-5^\circ$). Детально исследованы вариации формы ГИП с местным временем, сезоном, долготой, высотой, магнитной и солнечной активностью. Показано, в частности, что анализ вариаций формы ГИП не имеет смысла без учета долготы и полушария, поскольку постоянно приводит к противоречиям. Показано также, что при исследовании зависимости формы ГИП от магнитной активности необходимо учитывать развитие положительной и отрицательной фазы бури на обеих стенках и в минимуме ГИП. При низкой солнечной активности форма ГИП в гораздо большей степени, чем при высокой активности, определяется динамикой ионосферы, связанной с возмущениями, и поэтому сильно изменяется с высотой.

5. Получена детальная картина динамики провалов в период интенсивных магнитных бурь на основе детального анализа около 50 событий. В частности:

- Обнаружена задержка τ реакции ГИП на магнитное возмущение, пропорциональная скорости изменения интенсивности возмущения. Ионосфера действует как слабoproпускающий фильтр, иначе говоря, она обладает инерционностью.

- Обнаружено, что задержка реакции КИП на магнитное возмущение на 1-1.5 ч больше на высотах максимума слоя F2, чем на высоте ~ 1000 км, что связано с характерным временем перестройки структуры максимума слоя F2.

- Введены более эффективные ($r \sim 0.95$) индексы магнитной активности, чем текущий Кр-индекс, для определения положения СИП: $Kp(\tau)$, учитывающий предысторию, и DR – магнитное поле кольцевого тока.

- Показано, что ГИП может скачком переходить в КИП на фазе роста возмущения и, наоборот, КИП скачком переходит в ГИП на восстановительной фазе бури.

- Выявлены сильные различия в динамике СИП в зависимости от местного времени: ГИП лучше выражен в вечернем, а КИП в утреннем секторе, в околополуденные часы они могут существовать одновременно. Задержка реакции СИП на изменения Кр растет с местным временем. УПИ вечером образуется на фазе роста бури, а утром – в начале восстановительной фазы.

- Обнаружено, что ярко развитая структура (КИП и связанный с ним пик Те), присущая скорее максимуму интенсивной бури, может появиться на поздней стадии восстановительной фазы бури даже после слабого роста Кр-индекса.

6. Построены более точные, чем известные, модели положения ГИП и КИП:

- Для ночных зимних и равноденственных условий построена эмпирическая модель положения ГИП для периода магнитной бури. По величине стандартного отклонения модель обеспечивает примерно вдвое большую точность на фазе роста бури и втрое - на восстановительной фазе. Это достигнуто разделением фаз магнитной бури, разделением ГИП и КИП и введением более адекватного, чем Кр, индикатора магнитной активности для положения ГИП - магнитного поля кольцевого тока DR.

- Для тех же геофизических условий получена более точная, чем известные, эмпирическая формула для положения минимума ГИП. Основное преимущество этой формулы над известными заключается в использовании эффективного индекса магнитной активности $K_p^*(t)$, который учитывает предысторию изменения уровня магнитной активности.

- Для тех же геофизических условий впервые построена точная ($r \sim 0.95$, $\sigma \sim 1.2^\circ$) эмпирическая модель положения минимума КИП на основе DR-индекса. Эта модель может быть использована для определения положения максимума скорости нагрева ионосферной плазмы на широтах магнитосферного DR-тока и связанного с ним положения SAR-дуги.

7. Выделенные закономерности в поведении разных провалов позволяют либо гораздо более уверенно говорить о механизмах их образования, либо выдвигать обоснованные гипотезы относительно наиболее вероятных причин.

- При высокой магнитной активности ГИП регулярно наблюдается даже днем, следовательно, самой сильной причиной образования ГИП является быстрый дрейф плазмы под действием электрического поля. В спокойных летних ночных и зимних дневных условиях ГИП образуется только в минимуме фоновой концентрации в результате действия механизма «полной тени» и высыпаний частиц на полярной стенке. Величина фоновой концентрации определяется, главным образом, уровнем солнечной ионизации, поэтому самой сильной «антипричиной» является Солнце.

- Изменения конфигурации ГИП (положения, глубины и ширины) зависят от долготно-широтных вариаций концентрации в области ГИП. Характер этих вариаций детально исследован, а вклад каждого фактора определен с помощью расчетов.

КИП образуется во время магнитосферной бури под действием тех же процессов, что и SAR-дуга. Образование ярко выраженного КИП в спокойное время вероятнее всего связано с возбуждением ионно-циклотронных волн.

- В ночных условиях экваториальная стенка ПЛИ формируется потоками ионов между ионосферой и плазмосферой. Глубокий минимум ПЛИ образуется в результате опустошения силовых трубок, связанного со сжатием плазмосферы во время бури. Дневной зимний ПЛИ является реликтом ночного ПЛИ. Существование дневного

летнего ПЛИ обусловлено, в основном, наличием хорошо выраженной полярной стенки. Суточные, сезонные и долготные вариации $[He^+]$ в области ПЛИ определяются вариациями $[O^+]$.

- Высокоширотные ($\Phi \geq 47-48^\circ$) дневные субпровалы связаны с образованием "отсранных облаков плазмы", а ночные субпровалы формируются тем же самым механизмом, что и КИП. Низкоширотные субпровалы ($\Phi \leq 35^\circ$) являются проявлением поднявшихся на большие высоты экваториальных «баблов». В промежуточной полосе средних широт ($\Phi \sim 35-50^\circ$) глубокие провалы ионизации формируются всплесками электрического поля, но главным образом в результате выноса легких ионов из летнего полушария в зимнее. Этот процесс наиболее эффективен в интервале местного времени 14-22 LT, на долготах, где концентрация плазмы намного выше, чем в сопряженном полушарии.

8. Построено глобальное (модельное) распределение $NmF2$, $hmF2$, Ne и Te в области ГИП, выделены долготно-широтные вариации $[He^+]$ и $[O^+]$ на высотах 1000-1200 км в области ПЛИ для разных геофизических условий. Показано, что многие элементы глобальной структуры (ГИП, КИП, дневной провал, «cliff», пик Te , ДЭ) до сих пор неадекватно воспроизводятся в существующих моделях ионосферы, в том числе и в IRI.

9. Детально исследованы причины долготно-широтных вариаций фоновой концентрации и высоты максимума слоя F2 в области ГИП. Для этого разработана методика расчета скорости вертикального дрейфа плазмы W из $hmF2$ на основе моделей ночной и дневной ионосферы. Впервые разработана методика выделения зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра из долготных вариаций W . С помощью этой методики определен вклад состава, температуры и ветра нейтральной атмосферы в долготно-широтные вариации $hmF2$. Определен вклад солнечной ионизации и параметров термосферы в долготные вариации $NmF2$.

10. Выявлены и исследованы многие проявления асимметрии между северным и южным полушариями Земли в параметрах верхней ионосферы. Асимметрия проявляется в разном характере долготных вариаций всех параметров: $hmF2$, $NmF2$, Ne , Te , Tn , $[O]$, $[N_2]$, $[O^+]$, $[He^+]$, скорости зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра, вероятности наблюдения, положения и формы ионосферных провалов (кроме КИП) и субпровалов. ДЭ во всех параметрах проще

по форме и больше по амплитуде в южном полушарии. Ярким примером асимметрии является то, что "cliff" ионизации в южном полушарии образуется, а в северном - нет. Причины асимметрии, в конечном итоге, сводятся к разнице между геомагнитным и географическим полюсами, и зависимости от долготы магнитуды, склонения и наклонения геомагнитного поля.

Итак получен целый ряд новых, иногда совершенно неожиданных результатов. Многие из них свидетельствуют о том, что еще недостаточно хорошо изучена даже крупномасштабная структура верхней ионосферы. Поэтому в заключение приведены перспективы дальнейших исследований, которые вытекают из полученных в работе результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Реакция ионосферы на магнитосферную бурю // Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука, 1985. С.68-77.
2. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Кушнеревский Ю.В., Шмилауэр Я. Структура субавроральной ионосферы в период магнитосферной бури по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэронавтика. 1985. Т.25. № 3. С.406-409.
3. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. 1. Положение провала // Геомагнетизм и аэронавтика. 1986. Т.26. № 1. С.63-68.
4. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. 2. Форма провала // Геомагнетизм и аэронавтика. 1986. Т. 26. № 4. С.682-684.
5. Карпачев А.Т. Глобальный долготный эффект в ночной внешней ионосфере по данным ИСЗ Интеркосмос-19. Препринт № 45(734). 1987. 28 С.
6. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Харьков И.П., Шмилауэр Я. Долготный контроль температуры электронов субавроральной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 1987. Т.27. № 3. С.409-412.
7. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в ночной среднеширотной ионосфере по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэронавтика. 1988. Т.28. №1. С.76-80.

8. Кузнецова Т.В., Карпачев А.Т. Изменения положения и структуры каспа во время магнитной бури 2-4.04.79 по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Межпланетная среда и магнитосферные процессы. Москва.: Наука. 1991. С.107-120.
9. Ben'kova N.P., Deminov M.G., Karpachev A.T. et. al. Longitude features shown by topside sounder data and their importance in ionospheric mapping // Adv. Space Res. 1990. V.10. № 8. P.57-66.
10. Karpichev A.T. and Pulinets S.A. IRI model comparison with topside sounding data in the light of global longitudinal effect // Data validation of ionospheric model and maps (VIM). Publicaciones del Observatorio del Ebro. 1992. V.16. P.93-99.
11. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Морозова Л.П. Субавроральная ионосфера в период SUNDIAL в июне 1987 г. по данным ИСЗ Космос-1809 // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. № 1. С.54-58.
12. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Шмилауэр Я. Изменения положения главного ионосферного провала в зависимости от долготы и геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. № 5. С.185-188.
13. Афонин В.В., Деминов М.Г., Карпачев А.Т. и др. Долготные вариации положения главного ионосферного провала для ночных зимних условий по данным ИСЗ "Космос-900" и "Интеркосмос-19" // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. № 2. С.75-78.
14. Карпачев А.Т. Глобальные вариации foF2 в области ночного провала // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. № 5. С.94-98.
15. Карпачев А.Т., Ларкина В.И., Пулинсц С.А. Вариации электромагнитных шумов в дневной внешней ионосфере в период возмущения 2-4 апреля 1979 г. // Космические исследования. 1993. Т.31. № 4. С.51-60.
16. Pulinets S.A., Karpachev A.T. and Shoya L.D. The role of topside sounding in modelling of the topside ionospheric F-region - the present situation and future possibilities // PRIME studies with emphasis on TEC and topside modelling. Wissenschaftlicher Bericht. 1993. №2. Teil 1. Graz, Austria. P.29-37.
17. Карпачев А.Т., Афонин В.В., Шмилауэр Я. Вариации положения минимума ночного провала с долгой зимой и в равноденствии: сравнение // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т.34. № 1. С.70-75.
18. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Аннакулиев С.К., Шмилауэр Я. Динамика среднеширотного ионосферного провала

- в периоды бурь. I. Качественная картина // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. № 1. С.73-79.
19. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Аннакулиев С.К. Динамика среднеширотного провала в период магнитной бури. Главная фаза // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. № 6. С.69-77.
 20. Карпачев А.Т. Распределение электронной концентрации во внешней ионосфере высоких широт южного полушария для ночных летних условий // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. № 6. С.82-88.
 21. Karpachev A.T., Deminova G.F., Pulinets S.A. Ionospheric changes in response to IMF variations // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V.57. № 12. P.1415-1432.
 22. Ижовкина Н.И., Карпачев А.Т., Пулинец С.А. Структурные особенности верхней дневной ионосферы по данным спутника "Интеркосмос-19" // Космические исследования. 1996. Т.34. № 2. С.125-129.
 23. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Аннакулиев С.К. Динамика среднеширотного провала в периоды бурь: восстановительная фаза // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т.36. № 4. С.45-52.
 24. Deminov M.G., Karpachev A.T., Annakuliev S.K., Afonin V.V. and Smilauer Ya. Dynamics of the ionization troughs in the night-time subauroral F-region during geomagnetic storms // Adv. Space Res. 1996. V.17. № 10. P.141-145.
 25. Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Interkosmos-19 satellites data // Adv. Space Res. 1996. V.18. №6. P.221-230.
 26. Карпачев А.Т. Распределение электронной концентрации вблизи максимума слоя F2 в северном полушарии для ночных летних условий // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т.36. № 3. С.86-92.
 27. Карпачев А.Т., Афонин В.В., Шмилауер Я. Распределение температуры электронов в области ионосферного провала для летних ночных условий // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т.37. № 1. С.96-103.
 28. Карпачев А.Т., Афонин В.В. Два типа дневного зимнего ионосферного провала, выделенные по данным спутника Космос-900 на высотах 350-550 км // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т.38. № 3. С.68-78.

29. Карпачев А.Т., Афонин В.В. Зависимость вероятности наблюдения ионосферных провалов от сезона, местного времени, долготы и уровня магнитной активности // Геомагнетизм и аэронавтика. 1998. Т.38. № 3. С.79-91.
30. Карпачев А.Т., Гасилов Н.А. Вариации вертикального дрейфа плазмы с долготой в среднеширотной ночной летней ионосфере, рассчитанные по данным измерений hmiF2 // Геомагнетизм и аэронавтика. 1998. Т.38. № 5. С.89-99.
31. Karpachev A.T., Deinikov M.G. and Afonin V.V. Two branches of day-time winter ionospheric trough according to Cosmos-900 data at F2-layer heights // Adv. Space Res. 1998. V.22. № 6. P 877-882.
32. Карпачев А.Т., Афонин В.В. Вариации положения дневных зимних ионосферных провалов с долготой // Геомагнетизм и аэронавтика. 1999. Т.39. №2. С.65-71
33. Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Выделение провала и субпровала в легких ионах по данным спутника ISS-b на высоте ~1100 км // Геомагнетизм и аэронавтика. 1999. Т. 39. № 3. С.54-61.
34. Ижовкина Н.И., Афонин В.В., Карпачев А.Т., Пулинцев С.А. Структура ионосферного провала для разных уровней геомагнитных возмущений и источники нагрева плазмы верхней дневной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. 1999. Т.39. № 4. С.39-43.
35. Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Зависимость вероятности наблюдения среднеширотного провала и низкоширотного субпровала в концентрации ионов He⁺ от сезона, местного времени и магнитной активности // Геомагнетизм и аэронавтика. 2000. Т.40. № 2. С.23-33.
36. Карпачев А.Т., Гасилов Н.А. Выделение зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра из долготных вариаций hmiF2 // Геомагнетизм и аэронавтика. 2000. Т.40. № 4. С.79-87.
37. Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Долготные вариации вероятности наблюдения провала и субпровала в концентрации ионов He⁺ для ночных условий // Геомагнетизм и аэронавтика. 2000. Т.40. № 5. С.52-62.
38. Карпачев А.Т. Характеристики кольцевого ионосферного провала // Геомагнетизм и аэронавтика. 2001. Т.41. № 1. С.57-66.

Карначев Александр Трофимович
СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОВАЛОВ ♣

Подписано к печати 25.04.01 г.
Усл. печ. л. 2. Бесплатно. Заказ № 33
Тираж 100 экз.
Отпечатано в ИЗМИРАН
142190, г.Троицк Московской области

2-00